ISSN 2223-0807
Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК: 621.7.07
doi:10.18720/SPBPU/2/id-148

М.Г. Лопатов[1], О.С. Тимофеева[2]

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЛИСТОВОГО ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

[1]Максим Геннадьевич Лопатов,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(937)652-3115, E-mail max.lopatov@rambler.ru.

[2]Ольга Сергеевна Тимофеева,
Университет ИТМО
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7(921) 794 8654, E-mail: olga2957869@mail.ru.

Аннотация

Листовое штамповочное производство отличается высокой скоростью и стабильностью процесса изготовления деталей с высокой повторяемостью формы, в связи с чем данная технология широко применяется в условиях массового производства. Однако, в условиях текущей политики импортозамещения и роста числа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, штамповка всё чаще применяется и для изготовления малых серий и единичных образцов продукции. В работе рассмотрены вопросы оптимизации технологической подготовки листового штамповочного производства. Результаты исследований показали, что значительного сокращения длительности ТПП можно достичь за счет внедрения в процессы технологической подготовки производства новых технологий, в частности, аддитивных. Применение современных технологий также может позволить значительно повысить скорость переналадки штамповочного оборудования. В данном исследовании представлен алгоритм применения аддитивных технологий в листовом штамповочном производстве.

Ключевые слова: Технологическая подготовка производства, листовая штамповка, аддитивные технологии, формообразующая деталь, мелкосерийное производство.

Введение

Согласно стратегии технологического развития Российской Федерации, на период до 2030 года национальная экономика должна обеспечивать производство высокотехнологичной продукции – чипов и другой микроэлектроники, высокоточных станков и робототехники, авиакосмической техники, беспилотников, телекоммуникационной техники и программного обеспечения. При этом доля отечественных товаров в общем объёме потребления должна составить не менее 75% [1]. Условиями создания такой продукции являются обязательное использование средств цифрового проектирования, применение информационных технологий мониторинга и управления процессами технологической подготовки производства (ТПП), а также применение новых технологий.

Конструкции современных приборов содержат множество различных деталей, для изготовления которых, как правило, применяются различные способы обработки материалов: механическая обработка резанием, обработка давлением, литьё под давлением, электрохимические, электрофизические способы обработки и другие. С помощью листовой штамповки изготавливают множество деталей приборов. Данный способ обработки отличается высокой повторяемостью, скоростью и дешевизной при производстве крупных партий изделий. Согласно статистике, предоставленной службой главного технолога авиаприборостроительного предприятия, способом листовой штамповки получают примерно 35-40% деталей приборов (рис. 1).

Рис. 1. Распределение способов обработки материалов на приборостроительном предприятии

Существующая в настоящее время стратегия импортозамещения способствует появлению большого числа опытно-конструкторских работ, в связи с чем необходимо изготавливать мелкие серии изделий и единичные образцы. В связи с тем, что длительность технологической подготовки производства в таких случаях превышает длительность непосредственно процесса штамповки, выявлять способы сокращения временных и финансовых затрат на процессы подготовки производства. Одним из важнейших показателей конкурентоспособного производства является показатель его гибкости – скорость переналадки. Применение новейших технологий может позволить вывести скорость переналадки оборудования на новый уровень.

По мнению авторов данной работы, перспективным направлением развития идей быстрой переналадки является внедрение аддитивных технологий для изготовления сменных формообразующих деталей (пуансон/нож и матрица).

Аддитивные технологии являются одной из самых быстроразвивающихся технологий и находят своё применение в различных областях [2-11]. Благодаря большому ассортименту используемых для печати материалов, а также разнообразным технологиям трёхмерной печати открываются широчайшие перспективы применения аддитивных технологий. К преимуществам аддитивных технологий относят эффективность при изготовлении сложных геометрических форм, высокую скорость изготовления изделий, а также относительную дешевизну оборудования и материалов. Однако, у данной технологии существуют и ограничения: используемые полимерные материалы могут не иметь требуемых физически свойств, а рабочие поверхности напечатанных деталей, как правило, требуют дополнительной обработки, что увеличивает длительность процесса.

В настоящее время осуществляются попытки внедрения аддитивных технологий в процессы технологической подготовки производства в различных областях промышленности. Многие исследователи уже исследовали потенциал внедрения аддитивных технологий в производственные процессы. Например, известны случаи повышения эффективности литьевого [12], штамповочного [13] и фрезерного [14] производств.

В России аддитивные технологии для инструментального производства – это относительно новая область. Несмотря на широкое применение аддитивных технологий в других отраслях, полное понимание их технических, инженерных и экономических аспектов отсутствует.

Методы

Задачей данной исследовательской работы является создание и апробация алгоритма внедрения аддитивных технологий в процесс технологической подготовки листового штамповочного производства. Для оценки эффекта от внедрения полимерную штамповую оснастку планируется использовать в условиях единичного и мелкосерийного производства, а также для создания тестовых образцов деталей.

Благодаря проведённому в работе [15] анализу известно о возможности сокращения длительности и стоимости подготовки производства вплоть до 60% в условиях мелкосерийного производства. Все авторы отмечают, что применение аддитивных технологий для изготовления сменного комплекта формообразующих деталей (ФОД) может позволить сократить время ТПП штамповочного производства. В работах указывается, что длительность и стоимость изготовления полимерного комплекта ФОД с применением аддитивных технологий значительно ниже, чем изготовление такого же комплекта с помощью традиционных методов металлообработки (эрозионные, фрезерные и токарные работы).

Изготовленный с применением аддитивных технологий комплект ФОД из металлического порошка не уступает по прочностным характеристикам комплекту, изготовленному с применением традиционных технологий, однако на данный момент нет точного ответа из металлического порошка комплекта.

Результаты

В результате проведенного исследования был разработан алгоритм по внедрению аддитивных технологий в процесс ТПП:

1. Выбор объекта для изготовления методом штамповки, выбор штампа;
2. Проектирование объекта и ФОД в системе автоматического проектирования;
3. Моделирование технологического процесса в CAE-системе и выбор оптимального материала оснастки для 3D печати;
4. Выбор технологии печати и модели принтера для 3D печати в зависимости от технических требований к изделию;
5. Изготовление оснастки, штамповка изделия;
6. Анализ полученных результатов, выявление зависимостей, добавление информации в базу знаний и рекомендаций по выбору материалов 3D печати.

Главной целью данного алгоритма является составление базы данных для производства, благодаря которой появится возможность быстро и

безошибочно подбирать оптимальную технологию и подходящие для конкретных случаев материалы трёхмерной печати.

Далее представлена апробация части алгоритма. В качестве объекта для эксперимента было выбрано изделие из тонколистового (толщина 1 мм) алюминия (рис. 2). Величина партии - 50 деталей. В качестве САПР выбрана программа «Компас-3Д». В будущих исследованиях планируется использование модуля «Штампы-3Д», благодаря которого может сократиться не только время изготовления ФОД, но и время проектирования. На данный момент разработчик модуля проявил интерес к данному исследованию и готов предоставить данный модуль в пользование на безвозмездной основе.

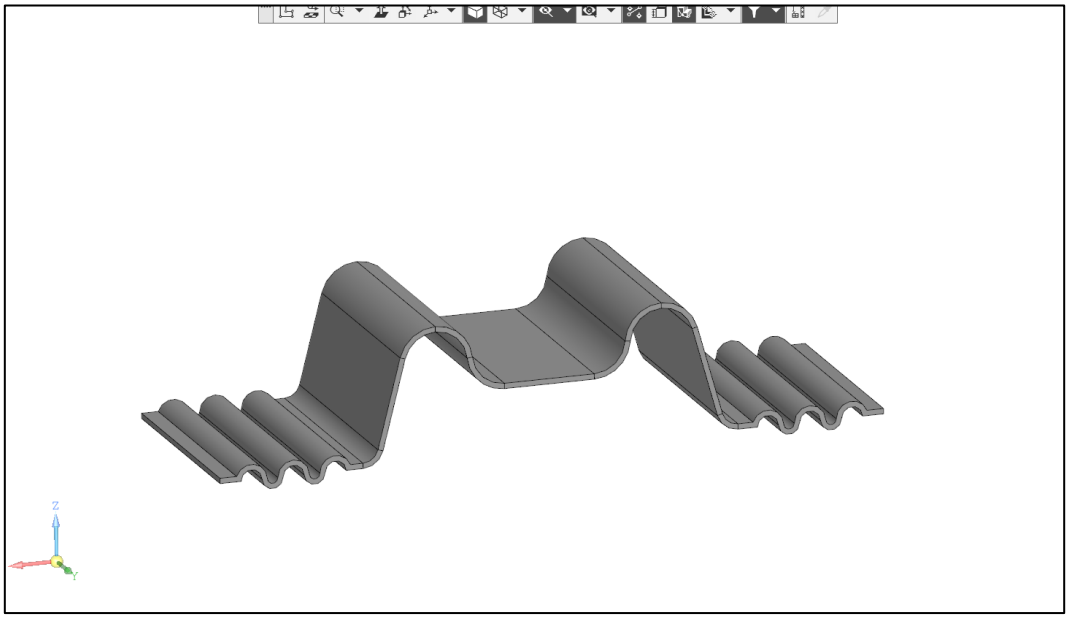

Рис. 2. Трёхмерная модель изделия

В качестве CAE системы выбрана программа «Simufact Forming», благодаря которой можно моделировать процессы штамповки, а также заниматься решением задач отладки и оптимизации технологических процессов (рис. 3).

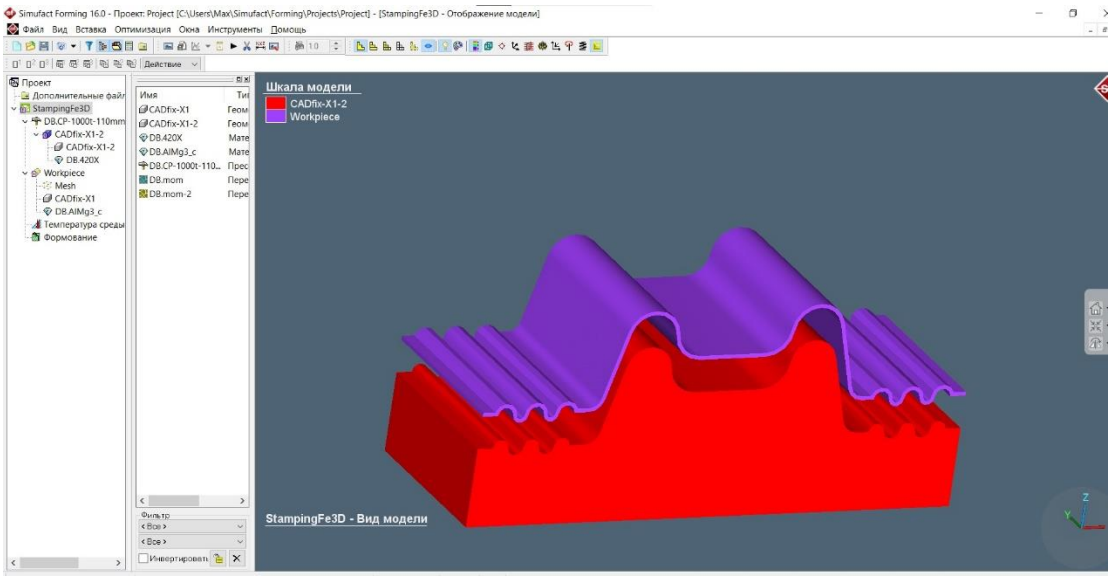

Рис. 3. Моделирование процесса штамповки в CAE-системе «Simufact Forming»

Для реализации экспериментального процесса штамповки выбран штамп ручного действия (рис. 4).

Рис. 4. Ручной пресс

В качестве аддитивного оборудования выбран FDM-принтер, а в качестве материала ФОД - полимер PETG. Данная технология 3D-печати является относительно дешёвой, а PETG пластик обладает достаточной прочностью для штамповки изделий из тонколистового алюминия.

Согласно исследованиям других авторов, таких ФОД хватает на 500-1000 рабочих ходов штампа (500-1000 отштампованных деталей), что соответствует мелкой серии. Стоит отметить, что у выбранной детали сложная геометрическая форма и изготовление ФОД (рис. 5,6) для такой детали классическим способом требует применения двух видов станков с числовым программным управлением (ЧПУ), что усложняет технологию изготовления, а, следовательно, длительность и итоговую стоимость изделия.

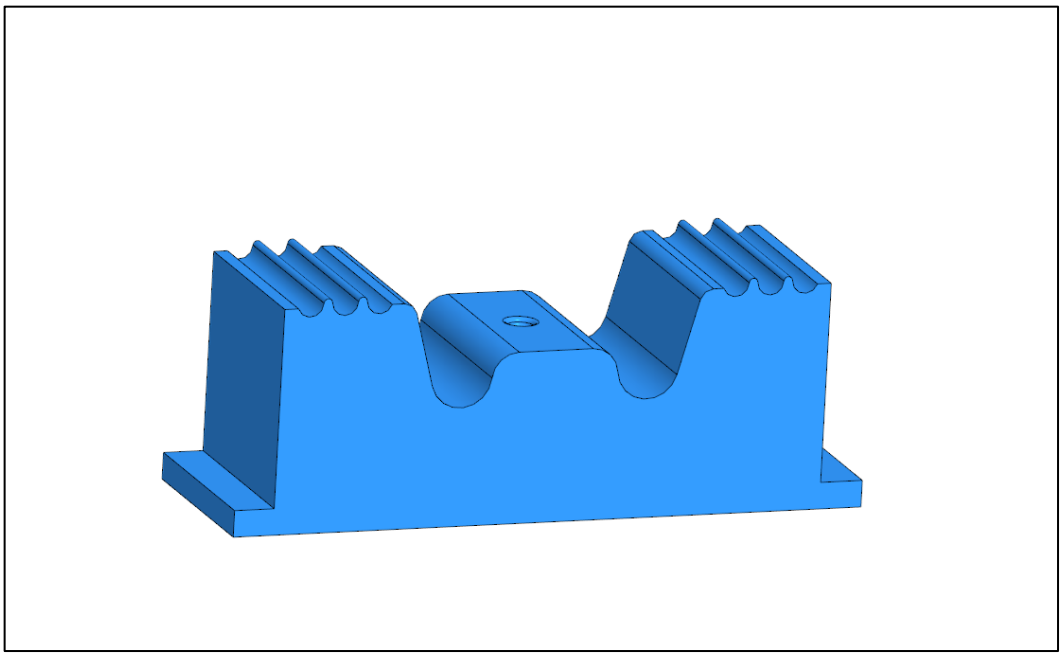

Рис. 5. Матрица

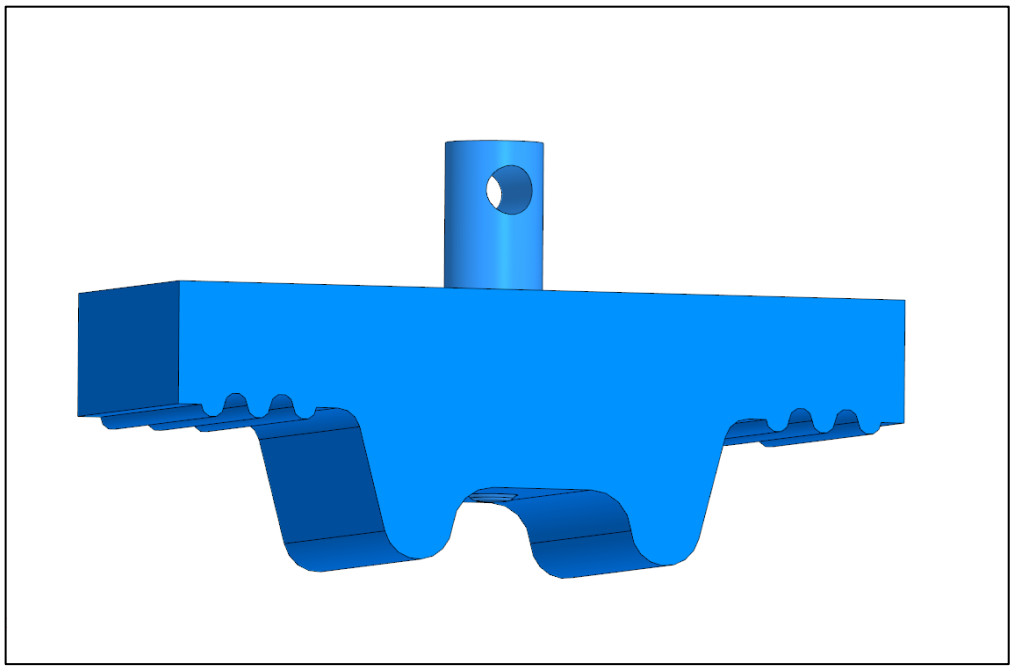

Рис. 6. Пуансон

На данном этапе исследования принято решение, что изготовление будет производиться на специализирующемся на трёхмерной печати предприятии. Для сравнения, был сделан заказ на опытно-экспериментальном производстве, где изготовление ФОД будет производиться с применением станков с ЧПУ. Сравнение предварительной стоимости и длительности изготовления ФОД представлено в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение стоимости и времени изготовления оснастки

	Метод изготовления оснастки	
	ЧПУ (Фрезерная и эрозионная обработка)	Аддитивное (FDM-принтер)
Стоимость работы	55 тыс. руб.	15-20 тыс. руб.
Коэффициент использования материала	30-40%	90-100%
Стоимость материала	64 руб./кг	1500 руб./кг
Машинное время изготовления	15-20 часов	14-20 часов

Исходя данных, приведенных в таблице можно сделать вывод, что аддитивный метод (FDM-печать) изготовления оснастки обладает существенными преимуществами перед традиционным методом ЧПУ-обработки (фрезерная и эрозионная обработка) в отношении стоимости и использования материала. Хотя стоимость материала для FDM-печати значительно выше (1500 руб./кг против 64 руб./кг), более высокий коэффициент использования материала (90-100% против 30-40%) приводит к существенному снижению общей стоимости изготовления. Также стоит отметить, что вес полимерных ФОД значительно ниже ФОД изготовленных традиционными способами с помощью станков с ЧПУ. Время изготовления в обоих случаях же сопоставимо. Также стоит отметить, что вследствие использования двух станков с ЧПУ возникает вероятность брака или ошибки.

В итоге, несмотря на более высокую стоимость материала, аддитивный метод (FDM-печать) оказывается экономически более выгодным, благодаря значительному снижению отходов и стоимости работы.

Обсуждение

Результаты исследования показали, что благодаря внедрению аддитивных технологий можно существенно сократить длительность и стоимость изготовления штамповой оснастки. Данный результат призван в первую очередь показать, что аддитивные технологии – крайне перспективное направление для повышения конкурентоспособности промышленных предприятий.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие аддитивных технологий (синтез новых материалов, появление более совершенных 3D принтеров и тд.), что обуславливает повышение конкурентоспособности и получение экономической выгоды предприятиями, инвестирующими в данную область уже на текущий момент.

На текущий момент исследователи независимо друг от друга проводят экспериментальные исследования с изготовлением полимерных ФОД [16-20]. Однако эти эксперименты направлены лишь на определение принципиальной возможности реализации процесса штамповки с применением полимерной оснастки, что свидетельствует о необходимости проведения комплексных исследований, направленных на оптимизацию технологических параметров процесса печати, оценку долговечности полимерных инструментов, а также на изучение влияния различных факторов, таких как параметры печати, свойства полимерных материалов и других на качество получаемых изделий.

Заключение

Для полного раскрытия потенциала применения аддитивных технологий необходимо исследование взаимозависимостей выбора материалов, выявления требований к процессу печати и ограничений использования таких технологий. Обобщение и структуризация результатов уже проведенных экспериментов может существенно ускорить решение поставленной задачи, а также привлечь новых исследователей к решению данной задачи.

Применение изготовленной с помощью аддитивных технологий оснастки может быть эффективным решением при проверке правильности конструкции на этапах опытно-конструкторских работ или же применяться в мелкосерийном производстве при изготовлении малых серий изделий. В ходе дальнейшей исследовательской работы будут изготовлены описанные в работе ФОД, а также произведены эксперименты с большим количеством комбинаций материалов печати и материалов заготовок. Глобальным результатом данной работы будет являться обобщённая база знаний для выбора оптимальных материалов и технологий трёхмерной печати, в

зависимости от параметров изготавливаемой детали. Данная база будет удобным инструментом для быстрого и эффективного проектирования и производства оснастки, сокращая длительность и стоимость разработки и изготовления единичных опытных образцов и малых партий продукции. Она позволит инженерам-технологам принимать обоснованные решения при выборе оптимальных материалов и параметров печати для конкретных задач, минимизируя риски и повышая эффективность процесса ТПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Концепция технологического развития на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. N 1315-р;

[2] Егоров, К. Н. Аддитивные технологии в медицине: области и технологии применения, преимущества, недостатки и перспективы развития / К. Н. Егоров, С. А. Егорова, В. Г. Петрякова // Перспективы развития науки в современном мире : Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции, Уфа, 29 июня 2021 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2021. – С. 21-41.

[3] Нагибович, О. А. Современное состояние и перспективы клеточных технологий, аддитивного производства и тканевой инженерии в военной медицине / О. А. Нагибович, А. С. Голота, А. Б. Крассий // Военно-медицинский журнал. – 2019. – Т. 340, № 4. – С. 60-63.

[4] Смуров, И. Ю. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность / И. Ю. Смуров, С. Г. Конов, Д. В. Котобан // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2015. – № 2(14). – С. 11-22. – EDN TONSTV.

[5] Дремухин, М. А. Применение аддитивных технологий в машиностроении для изготовления формообразующей оснастки / М. А. Дремухин, В. Н. Наговицин // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 1(39). – С. 21-28. – DOI 10.26732/j.st.2022.1.03.

[6] Суворов, А. П. Использование аддитивных технологий в производстве фасонных поверхностей / А. П. Суворов, А. В. Кузовкин // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2017. – № 2(41). – С. 9-15. – EDN YPZERJ.

[7] Чемодуров, А. Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения / А. Н. Чемодуров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 210-217.

[8] Мирошниченко, В. С. Аддитивные технологии в литейном производстве / В. С. Мирошниченко, А. Н. Голофаев, Н. А. Тараненко // Металлургия XXI столетия глазами молодых: СБОРНИК ДОКЛАДОВ V международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Донецк, 22 мая 2019 года / Отв. ред. Кочура В.В.. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2019. – С. 111-113.
[9] Гайсина, Д. Г. Аддитивные технологии в ювелирном производстве / Д. Г. Гайсина // Research and development - 2024: Сборник статей Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 20 мая 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 34-40.
[10] Лунева, Д. А. Применение 3d-печати в строительстве и перспективы ее развития / Д. А. Лунева, Е. О. Кожевникова, С. В. Калошина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 90-101. – DOI 10.15593/2224-9826/2017.1.08.
[11] 3D-печать в строительстве / Н. И. Ватин, Л. И. Чумадова, И. С. Гончаров [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 1(52). – С. 27-46. – DOI 10.18720/CUBS.52.3.
[12] Яблочников, Е. И. Эффективность применения аддитивных технологий для изготовления литьевых форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов / Е. И. Яблочников, А. А. Грибовский, А. В. Пирогов // Металлообработка. – 2013. – № 5-6(77-78). – С. 74-80. – EDN SBOFEH.
[13] Fabio Tondini, Ulfar Arinbjarnar, Alberto Basso, Chris Valentin Nielsen, 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production, Procedia CIRP, Volume 103, 2021, Pages 91-96, ISSN 2212-8271
[14] Бруев, В. Н. Применение гибридных технологий в аэрокосмической промышленности / В. Н. Бруев // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей LXII Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 декабря 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. – С. 88-90. – EDN VOQPYU.
[15] Лопатов М.Г., Тимофеева О.С. Применение аддитивных технологий в технологической подготовке листового штамповочного производства // Известия высших учебных заведений. Приборостроение - 2025. - Т. 68. - № 4
[16] Определение механических свойств вытяжного инструмента, изготовленного методом FDM-печати // Сережкин М.А., Гроссман М.Ф. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 4 (360). С. 172-183.

[17] Klimyuk D., Serezhkin M., Plokhikh A. Application of 3D printing in sheet metal forming // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol.38. P. 1579–1583
[18] Frohn-Sörensen, P., Geueke, M., Tuli, T.B. et al. 3D printed prototyping tools for flexible sheet metal drawing. Int J Adv Manuf Technol 115, 2623–2637 (2021).
[19] Schuh G., Bergweiler G., Bickendorf P., Fiedler F., Colag C. Sheet metal forming using additively manufactured polymer tools // Procedia CIRP. 2020. Vol.93. P. 20–25.
[20] Naotaka Nakamura, Ken-ichiro Mori, Fumie Abe, Yohei Abe, Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer, Procedia Manufacturing, Volume 15, 2018, Pages 737-742, ISSN 2351-9789,

M.G. Lopatov, O.S. Timofeeva

PERSPECTIVES OF ADDITIVE TECHNOLOGIES APPLICATION FOR TECHNOLOGICAL PREPARATION OF SHEET METAL STAMPING PRODUCTION

ITMO University, Russia

Abstract

Sheet metal stamping is characterized by high speed and stability of the process of manufacturing parts with high repeatability of shape, therefore, this technology is widely used in the conditions of mass production. However, under the current policy of import substitution and the growing number of research and development work, stamping is increasingly used for the manufacture of small series of products. The paper considers the issues of optimization and reduction of time of technological preparation of sheet metal stamping production. The results of the research have shown that significant changes are noted due to the introduction of new technologies, in particular, additive technologies, into the processes of technological preparation of production. The application of modern technologies can also allow for a significant increase in the speed of changeover of stamping equipment. This study presents an algorithm for the application of additive technologies for sheet metal stamping production.

Key words: Technological preparation of production, sheet metal stamping, additive technologies, forming part, small-scale production.

REFERENCES

[1] The concept of technological development for the period up to 2030, approved by the order of the Government of the Russian Federation from 20 May 2023 N 1315-r;

[2] Egorov, K. N. Additive technologies in medicine: areas and technologies of application, advantages, disadvantages and prospects of development / K. N. Egorov, S. A. Egorova, V. G. Petryakova // Prospects for the development of science in the modern world : Collection of scientific articles on the materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Ufa, 29 June 2021. - Ufa: Limited Liability Company 'Scientific and Publishing Centre "Vestnik nauki", 2021. - C. 21-41.
[3] Nagibovich, O. A. Current state and prospects of cell technologies, additive manufacturing and tissue engineering in military medicine / O. A. Nagibovich, A. S. Golota, A. B. Krassiy // Military Medical Journal. - 2019. - T. 340, № 4. - C. 60-63.
[4] Smurov, I. Yu. On the introduction of additive technologies and production in the domestic industry / I. Yu. Smurov, S. G. Konov, D. V. Kotoban // Novosti materialovedeniya. Science and Technology. - 2015. - № 2(14). - C. 11-22. - EDN TONSTV.
[5] Dremukhin, M. A. Application of additive technologies in mechanical engineering for manufacturing of moulding tooling / M. A. Dremukhin, V. N. Nagovitsin // Spacecrafts and technologies. - 2022. - T. 6, № 1(39). - C. 21-28. - DOI 10.26732/j.st.2022.1.03.
[6] Suvorov, A. P. Use of additive technologies in the production of shaped surfaces / A. P. Suvorov, A. V. Kuzovkin // Bulletin of P. A. Solovyov Russian State Automobile Technical Academy named after P. A. Solovyov. - 2017. - № 2(41). - C. 9-15. - EDN YPZERJ.
[7] Chemodurov, A. N. Application of additive technologies in the production of engineering products / A. N. Chemodurov // Izvestia Tula State University. Technical Sciences. - 2016. - № 8-2. - C. 210-217.
[8] Miroshnichenko, V. S. Additive technologies in foundry production / V. S. Miroshnichenko, A. N. Golofaev, N. A. Taranenko // Metallurgy of the XXI century through the eyes of the young: Collection of reports of the V international scientific-practical conference of young scientists and students, Donetsk, 22 May 2019 / Edited by V. V. Kochura. - Donetsk: Donetsk National Technical University, 2019. - C. 111-113.
[9] Gaisina, D. G. Additive technologies in jewellery production / D. G. Gaisina // Research and development - 2024: Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference, Petrozavodsk, May 20, 2024. - Petrozavodsk: International Centre for Scientific Partnership 'New Science' (IP Ivanovskaya I.I.), 2024. - C. 34-40.
[10] [Luneva, D. A. Application of 3d-printing in construction and prospects of its development / D. A. Luneva, E. O. Kozhevnikova, S. V. Kaloshina // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture. - 2017. - T. 8, № 1. - C. 90-101. - DOI 10.15593/2224-9826/2017.1.08.

[11] 3D printing in construction / N. I. Vatin, L. I. Chumadova, I. S. Goncharov [et al] // Construction of unique buildings and structures. - 2017. - № 1(52). - С. 27-46. - DOI 10.18720/CUBS.52.3.
[12] [Yablochnikov, E. I. Effectiveness of additive technologies for manufacturing of injection moulds and in preparation of production of products from thermoplastic polymeric materials / E. I. Yablochnikov, A. A. Gribovsky, A. V. Pirogov // Metalloobrabotka. - 2013. - № 5-6(77-78). - С. 74-80. - EDN SBOFEH.
[13] Fabio Tondini, Ulfar Arinbjarnar, Alberto Basso, Chris Valentin Nielsen, 3D printing to facilitate flexible sheet metal forming production, Procedia CIRP, Volume 103, 2021, Pages 91-96, ISSN 2212-8271
[14] Bruev, V. N. Application of hybrid technologies in the aerospace industry / V. N. Bruev // Fundamental and applied scientific research: current issues, achievements and innovations : collection of articles of the LXII International Scientific and Practical Conference, Penza, 15 December 2022. - Penza: Science and Enlightenment (IP Gulyaev G.Yu.), 2022. - С. 88-90. - EDN VOQPYU.
[15] Lopatov, M.G.; Timofeeva, O.S. Application of the additive technologies in the technological preparation of the sheet stamping production (in Russian) // Izvestia vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Instrumentation - 2025. - Т. 68. - № 4
[16] [Determination of the mechanical properties of the drawing tool made by FDM-printing // Serezhkin, M.A.; Grossman, M.F. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2023. № 4 (360). С. 172-183.
[17] [Klimyuk D., Serezhkin M., Plokhikh A. Application of 3D printing in sheet metal forming // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol.38. P. 1579-1583
[18] Frohn-Sörensen, P., Geueke, M., Tuli, T.B. et al. 3D printed prototyping tools for flexible sheet metal drawing.Int J Adv Manuf Technol 115, 2623-2637 (2021).
[19] Schuh G., Bergweiler G., Bickendorf P., Fiedler F., Colag C. Sheet metal forming using additively manufactured polymer tools // Procedia CIRP. 2020. Vol.93. P. 20-25.
[20] Naotaka Nakamura, Ken-ichiro Mori, Fumie Abe, Yohei Abe, Bending of sheet metals using plastic tools made with 3D printer, Procedia Manufacturing, Volume 15, 2018, Pages 737-742, ISSN 2351-9789,